

浸漬ノズル近傍を上昇するアルゴン気泡の挙動に関する水モデル実験

渡邊 剛*・井口 学*

Water Model Experiment on the Behavior of an Argon Bubble Rising Near the Immersion Nozzle

Tsuyoshi WATANABE and Manabu IGUCHI

Synopsis : Attack of a large argon bubble onto the meniscus in the continuous casting mold is considered to be one of main causes for the mold powder entrapment. The immersion nozzle is poorly wetted by molten steel and, accordingly, an argon bubble rising near the immersion nozzle attaches preferably to it. Its rising velocity has a significant effect on the mold powder entrapment. Water model experiments are carried out to reveal the rising velocity of an argon bubble rising along the immersion nozzle. Water and air are used as the models for molten steel and argon gas, respectively. The immersion nozzle is modeled by a cylindrical rod made of acrylic resin. Contact angles chosen are 77°, 110°, and 144°. An air bubble attaches to a rod of the contact angle of 144°. The rising velocity of the bubble is much greater than that of an air bubble rising away from the rod. It decreases with an increase in the rod diameter. The drag coefficient also is obtained for estimating the velocity of an argon bubble rising along the immersion nozzle.

Key words : continuous casting; immersion nozzle; argon bubble; mold powder entrapment; interfacial tension; wettability.

1. 緒言

固体に液滴が接触するとき、その接触角はそれぞれの組み合わせにより異なる値を示し、接触角が大きいほど固体に対し液滴は濡れにくい。液体が固体に対し非常に濡れにくいとき、固体は液体を強くはじき、液中では気泡が固体に付着しやすくなる。鉄鋼精錬プロセスにおいてArガスを吹き込むことにより攪拌、成分調整を行う操作が広く用いられている¹⁻³⁾。連続 casting プロセスにおいてタンディッシュから鋳型へ溶鋼が流し込まれる場合にも、スライディングゲートから浸漬ノズル内へArガスが吹き込まれることが多い^{4,5)}。このような流れ場においては、固-液界面における濡れ性が容器内の溶鋼の流動、ひいては製造される鋼の品質を決定付ける重要な因子となりうる⁶⁾。従来、固体壁面の濡れ性が壁面近傍の液体の流動や気泡の挙動に及ぼす影響を調査するために、濡れにくい水平平板に付着する気泡の挙動、濡れ性の異なる内壁をもつ鉛直円管内の気液二相流についての調査、あるいはT字やY字型分岐管を用いた気液分離法といったさまざまな研究がなされてきた⁶⁻¹²⁾。

これらの研究の成果として、壁面の濡れ性が悪い場合、気泡は壁面に付着しやすいことや、接触角が著しく大きい、すなわち壁面の撥水性が強い場合には、壁面に付着しながら上昇する気泡の速度は自由上昇の気泡と比較して非常に

大きくなることなどが確認されている⁶⁾。

本研究では、タンディッシュから連続 casting 鋳型へ溶鋼を流入させるための浸漬ノズルのモデル実験として、2種類の撥水剤を塗布した丸棒をそれぞれ水中に浸漬することで固体壁面の濡れ性が気泡の上昇挙動に与える影響について気泡の形状、上昇速度、抵抗係数の観点から考察を行った。

2. 実験装置および測定方法

本実験で用いた装置の概略図を Fig. 1 に示す。水を張った浴内底部に半球状の容器を設置し、外部シリンジより空気を容器へ送り込んだ。空気の体積は1, 5, 10, 15, 25 cm³の5通りとした。この容器を回転させることにより既知の体積の気泡をノズルより上昇させ、その様子をハイスピードビデオカメラにより1秒間に100枚の速さで撮影した。

ノズルの真上に直径や水との接触角の異なる丸棒を鉛直に浸漬し、丸棒が気泡に与える影響を調査した。使用した丸棒の直径は1.0, 1.6, 2.5 cmの3通りである。また丸棒表面には接触角が110°と144°になるように撥水剤を塗付した。もとのアクリル壁面の接触角は77°であるので、丸棒直径と接触角の組み合わせに関して、計9通りの条件で測定を行った。丸棒の設置高さ、すなわちノズル出口から丸棒下端までの距離はノズルを出た気泡の上昇速度が一定に

なる高さである6cmとした。また、比較のために丸棒を浸漬しない自由上昇気泡についても同様に測定を行った。撮影は各条件につき3回ずつ行い、上昇速度の平均値を測定値とした。

3. 実験結果および考察

3・1 丸棒表面における水滴と気泡

本実験で使用した丸棒の上に置かれた水滴と気泡の写真をFig. 2に示す。水中において接触角 77° の亚克力壁面に対して気泡は付着せず、逆に接触角 144° の超撥水壁面(Coating (2))に対して気泡は強く付着している様子が分かる。接触角 144° のとき、気泡は壁面に沿って容易に移動する。一方、接触角 110° の撥水剤を塗布した壁面(Coating (1))には、気泡は壁面に付着することが確認されたが、 144° の場合と比べ壁面に沿っての移動はしにくかった。なお、気泡が接触角 77° の壁面に付着できないのは、気泡を壁面に接触させても固体表面との隙間に水が入ってきて、浮力によって気泡が上昇するためである。

3・2 丸棒を浸漬しない場合の気泡の上昇挙動

丸棒を浸漬しない場合の自由上昇気泡($V_B=10\text{ cm}^3$)の挙動を0.05秒ごとに撮影した結果をFig. 3に示す。写真の下端から上端までの距離は20 cmであり、0.25秒間で約10 cm

上昇していることが分かる。気泡形状は水平方向に長い、いわゆるキャップ状の形である。なお、写真にあるように気泡体積 V_B が 10 cm^3 以上のときはノズル出口から気泡が放出される時点で気泡の分裂が起こることが確認された。分裂が起こったときには最も速く上昇する気泡に着目した。丸棒を浸漬しない場合における気泡上昇速度を各気泡体積ごとにFig. 4に示す。なお、横軸は気泡の鉛直方向の位置である。気泡体積が 1 cm^3 で約 23 cm s^{-1} 、 5 cm^3 で約 30 cm s^{-1} の上昇速度となり、 10 cm^3 よりも初期体積が大きな気泡の上昇速度はややばらつきが見られたが、気泡体積が大きくなるにしたがって上昇速度も大きくなった。

気泡の自由上昇速度に関する従来の研究成果をまとめて提案されたCliftら¹³⁾の推奨値と比較したのがFig. 5である。横軸は体積等価直径である。本測定値と推奨値との一致はよい。

3・3 接触角が 77° と 110° の丸棒を浸漬した場合の気泡の上昇挙動

接触角 $\theta=110^\circ$ の丸棒を浸漬した場合の気泡上昇挙動をFig. 6に示す。丸棒近傍を上昇する気泡はコアンダ効果(Coanda effect: 物体が周囲の流体を背後に巻き込みつつ壁に沿って移動する場合、あるいは噴流が固体壁に沿って存在するとき、壁側の圧力が低下して、その物体や噴流が壁

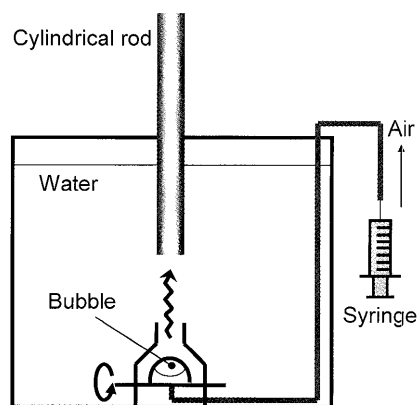


Fig. 1. Experimental apparatus.

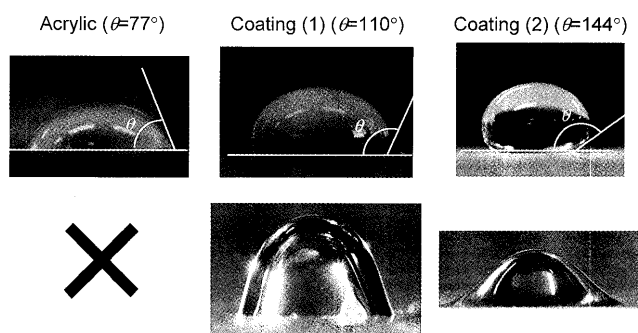


Fig. 2. Water droplet (upper) and bubble (bottom) on plain plate of different wettability. (The upper and lower photographs for each contact angle denote a water droplet and a bubble, respectively. The symbol, X, means that a bubble cannot remain on the solid surface due to prevailing effect of buoyancy acting on the bubble.)

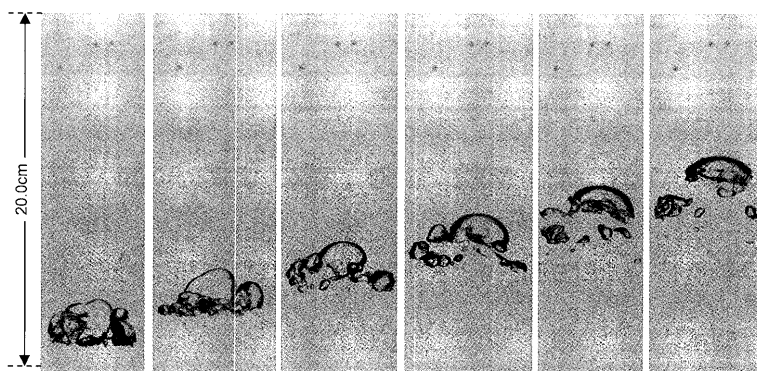


Fig. 3. Rising bubble in water (rod free, $V_B=10\text{ cm}^3$). (Photographs were taken successively at a time span of 0.05 s. Time elapsed from left to right.)

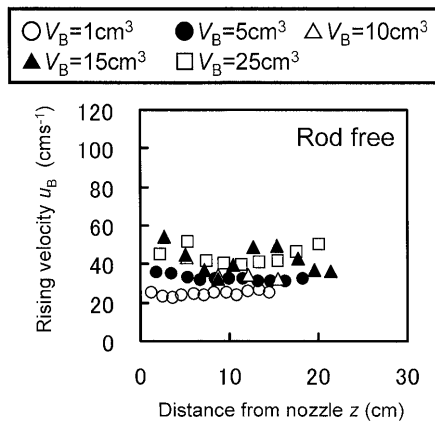
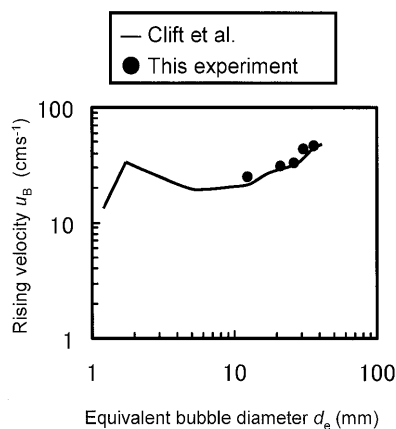
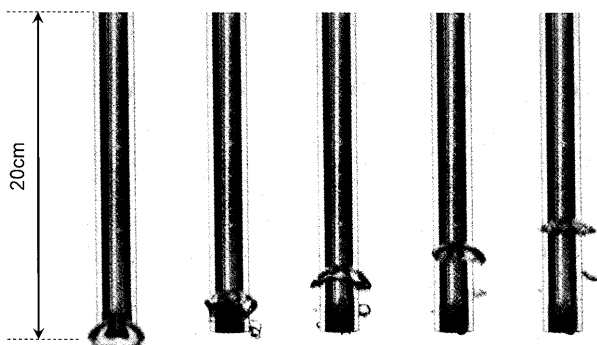
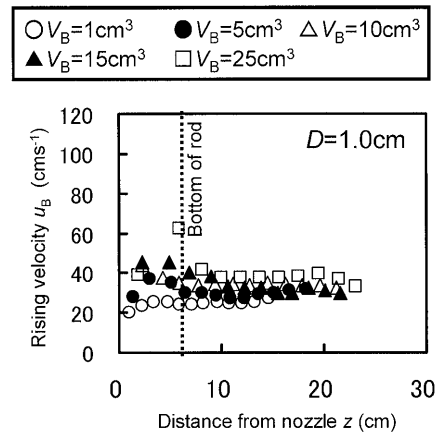
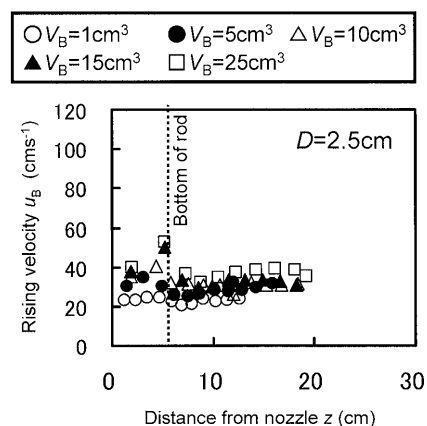
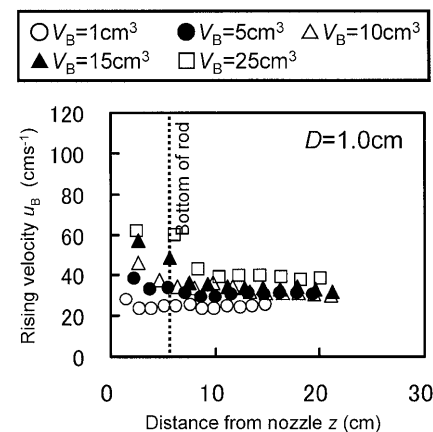


Fig. 4. Bubble rising velocity (rod free).

Fig. 5. Comparison of bubble rising velocity with that recommended by Clift *et al.* (rod free).Fig. 6. Rising bubble (rod of $\theta=110^\circ$, $D=2.5$ cm, $V_B=5$ cm³). (Photographs were taken successively at a time span of 0.05 s. Time elapsed from left to right.)

面に引き寄せられる効果) によって丸棒に引き寄せられ、丸棒を囲むように上昇するが、丸棒に直接接することはない。このことは $\theta=77^\circ$ の場合にもいえる。上昇速度を求めるに際しては、最も速く上昇する気泡に着目した。このような気泡の体積は元の体積の少なくとも 80% 以上である。丸棒底部に衝突することで一時的に気泡に変形が生じるが、その後は丸棒を設置することによる影響は見られず、接触角 77° の丸棒を浸漬した場合と同様の挙動を示し

Fig. 7. Bubble rising velocity (rod of $\theta=77^\circ$, $D=1.0$ cm).Fig. 8. Bubble rising velocity (rod of $\theta=77^\circ$, $D=2.5$ cm).Fig. 9. Bubble rising velocity (rod of $\theta=110^\circ$, $D=1.0$ cm).

た。なお、気泡形状は自由上昇気泡と同様にキャップ状であった。

接触角が 77° と 110° の丸棒を浸漬した場合の気泡上昇速度をまとめて Fig. 7~10 に示す。Fig. 7 と 8 はともに接触角 θ が 77° で、丸棒直径 D がそれぞれ 1.0 cm と 2.5 cm の場合を、Fig. 9 と 10 はともに θ が 110° で、 D がそれぞれ 1.0 cm と 2.5 cm の場合を表している。気泡体積が 10 cm³ 以上のときに、自由上昇の場合よりもわずかに上昇速度が小さくな

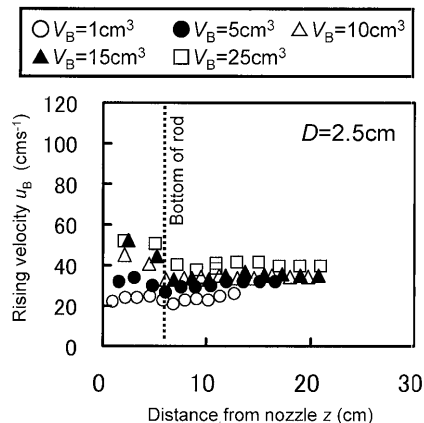


Fig. 10. Bubble rising velocity (rod of $\theta=110^\circ$, $D=2.5$ cm).

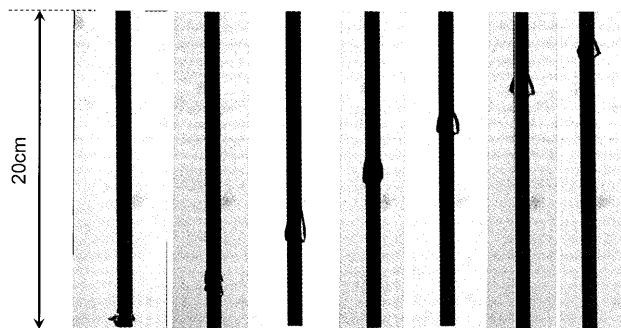


Fig. 11. Rising bubble ($\theta=144^\circ$, $D=1.0$ cm, $V_B=1\text{ cm}^3$). (Photographs were taken successively at a time span of 0.05 s. Time elapsed from left to right.)



Fig. 12. Rising bubble ($\theta=144^\circ$, $D=1.6$ cm, $V_B=15\text{ cm}^3$). (Photographs were taken successively at a time span of 0.05 s. Time elapsed from left to right.)

る傾向が見られた。これは、丸棒底部に衝突したことにより気泡が変形、分裂したためと考えられる。また、丸棒の接触角と直径の変化による気泡上昇挙動の違いはほとんど見られなかった。

3・4 接触角 144° の丸棒を浸漬した場合の気泡の上昇挙動

接触角 144° の丸棒を浸漬した場合の気泡上昇挙動を Fig. 11, 12 に示す。気泡はコアンダ効果によって丸棒に引き寄せられて、その一部が丸棒に接触すると、それをきっかけに次々と丸棒に引き込まれるように付着し、鉛直方向に長い形をとり上昇した。気泡体積が 10 cm^3 以上のときは衝突

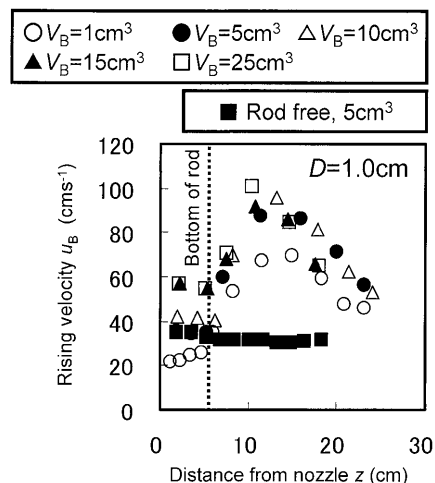


Fig. 13. Bubble rising velocity (rod of $\theta=144^\circ$, $D=1.0$ cm).

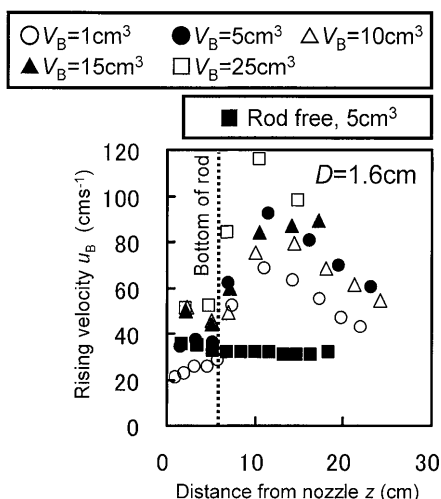


Fig. 14. Bubble rising velocity (rod of $\theta=144^\circ$, $D=1.6$ cm).

により気泡が分裂し、大部分は丸棒に接触したまま上昇を続けたが、一部は丸棒から離れて上昇した。この場合にも丸棒に付着した気泡の体積は元の体積の少なくとも 80% 以上であり、随伴するほかの気泡は丸棒から離れて自由上昇となるため、丸棒に付着しながら上昇する気泡よりは速度が小さい。

接触角が 144° の丸棒を浸漬した場合と丸棒を浸漬しない場合の上昇速度を比較して Fig. 13~15 に示す。上昇速度の測定値は 3 回の実験の平均値である。これらの図の丸棒直径 D はそれぞれ 1.0 cm, 1.6 cm, 2.5 cm である。気泡が丸棒に接触した後、急激に上昇速度が大きくなり、ピークを示したのち小さくなった。ピークが現れるのは気泡が鉛直方向に特に長くなったときである。このとき気泡の背後に形成される渦に起因する抵抗がもっとも小さくなっている。気泡体積の大きなものでは最も速い時で 100 cm s^{-1} を超えた。丸棒を浸漬しない場合と比較すると速度の違いが明らかにみとれる。また丸棒径ごとに比較してみると、

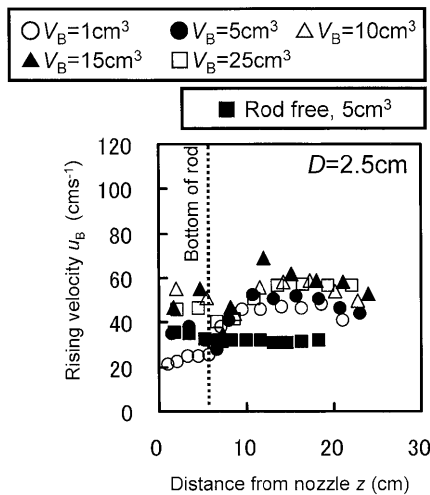


Fig. 15. Bubble rising velocity (rod of $\theta=144^\circ$, $D=2.5$ cm).

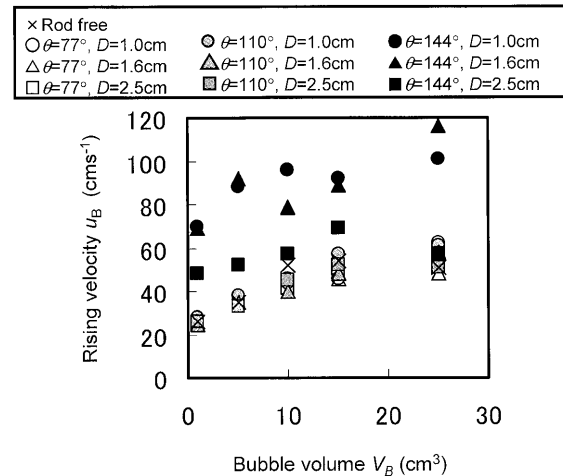


Fig. 16. Peak bubble rising velocity.

Table 1. Peak bubble rising velocity (cm/s).

$V_B(\text{cm}^3)$		$\theta=77^\circ$			$\theta=110^\circ$			$\theta=144^\circ$		
	Rod free	$D=1.0\text{cm}$	$D=1.6\text{cm}$	$D=2.5\text{cm}$	$D=1.0\text{cm}$	$D=1.6\text{cm}$	$D=2.5\text{cm}$	$D=1.0\text{cm}$	$D=1.6\text{cm}$	$D=2.5\text{cm}$
1	26	27	25	24	28	25	26	70	69	48
5	35	37	35	35	38	35	33	88	92	52
10	52	44	40	41	46	40	45	96	79	57
15	54	46	46	50	57	48	52	92	89	69
25	51	62	48	53	61	58	51	101	116	57

直径が2.5 cmの丸棒に沿って上昇する気泡の上昇速度は小さくなっていた。これは、丸棒との接触面積が大きくなりすぎて、丸棒壁と気泡との摩擦損失ならびに気泡と水との摩擦損失が大きくなるためである。

以上の測定結果のうち気泡の最大速度を抜き出してTable 1ならびにFig.16に示す。気泡上昇速度に気泡体積 V_B 、丸棒直径 D 、ならびに接触角 θ の影響に関して先に述べた傾向がこれらの図表から明瞭に見てとれる。

Fig. 2の気泡付着試験では、接触角 77° の場合のみ気泡が壁面に付着せず、浮上速度測定では 144° の場合のみ気泡が丸棒表面に付着したが、これについては以下のように考えられる。気泡付着試験では静止水中に置かれた固体表面に気泡を付着させたので、接触角 110° の場合にも気泡は 144° の場合と同様に固体表面に付着できたが、浮上速度測定では気泡自身が誘起する水の流れのために、接触角 110° の場合には丸棒に付着できなかった。したがって、気泡は接触角 77° のように丸棒から離れて上昇するために、上昇速度は 77° の場合に一致したと考えられる。

3・5 上昇気泡の抵抗係数

実機の浸漬ノズルと溶銅との接触角は約 130° から約 160° の間の値をとるといわれている¹⁴⁾。また実機では大量のアルゴンが浸漬ノズル内に吹き込まれているので、本実験で対象とした気泡よりも大きな気泡が浸漬ノズル出口で発生し、ノズル表面に付着しながら上昇していると考えられる。この場合の上昇速度を予測するには、抵抗係数に関

する情報が必要になる。そこで、上記上昇速度の実験結果に基づいて抵抗係数を求める。接触角 $\theta=77^\circ$, 110° の場合の気泡形状はRod freeの場合とほとんど同じであるため、抵抗係数 C_D もRod freeと同様であると考えられるので求めている。ただし、水-空気系で求めた C_D の値が溶銅-アルゴン系にそのまま適用できるかどうかについては、今後の検討が必要である。

流動抵抗 F_D は、抵抗係数 C_D を導入することで

$$F_D = C_D A_p \rho_L u_B^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

と示される¹³⁾。なお、丸棒に付着した気泡には固液界面を気液界面で置き換えることによる抵抗も存在するが⁹⁾、前報¹⁵⁾の円管内を上昇する気泡に関する研究で明らかのように、本実験条件下では無視できる。また、気泡の浮力 F_B と重さ F_W の差は

$$F_B - F_W = V_B (\rho_L - \rho_G) g \quad \dots\dots\dots (2)$$

で示される。気泡の形状をFig.17のように仮定する。気泡の水平面への投影面積 A_p を

$$A_p = dw \quad \dots\dots\dots (3)$$

とし、式(3)を式(1)に代入して得られる式を式(2)に等しいとおいて、 $\rho_L \gg \rho_G$ の関係をを用いれば、抵抗係数 C_D は以下のように表わされる。

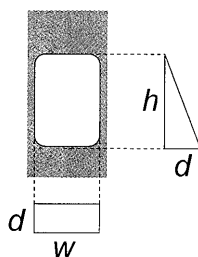


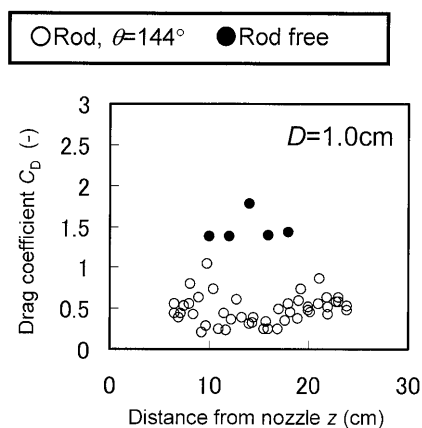
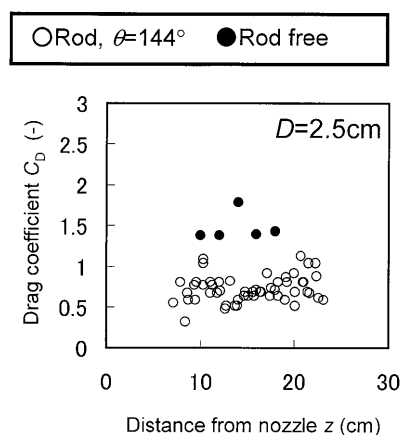
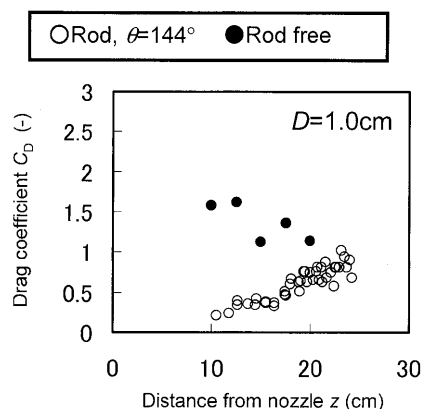
Fig. 17. Assumption of the shape of bubble.

$$C_D = gh/u_B^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

例えば, Fig.12の左から3番目の写真の最も大きい気泡の場合, $h=6.1$ cm, $d=1.6$ cm, $w=3.1$ cm, である。

式(1)と(2)が等しいとおくことは擬定常状態を仮定したことになる。本実験では気泡速度は時々刻々変化しているので, 厳密には定常状態の関係式を用いることができないが, 流動抵抗の非定常成分, すなわち気泡の加速・減速に要する力は小さく, 流動抵抗の変化はおもに気泡形状の変化に起因すると仮定して定常流の関係式を用いている。なお, 気泡に随伴している流体の質量, すなわち付加質量の値が分からないので詳細な議論はできないが, 気泡を球と仮定して付加質量を求めると $k\rho_L V_B$ ($k=1/2$) となる^{13, 16}。気泡の加速度を a とし, $\rho_L \gg \rho_G$ の関係を用いれば気泡の加速に要する力は $k\rho_L V_B a$ となり, 気泡に働く浮力と重さの差($F_B - F_W$)との比は ka/g となる。上昇速度の測定結果から加速度 a を求めて計算してみると, 本実験範囲では, ka/g の値は大きくとも約0.2であり, 1よりかなり小さい。鉛直方向に伸びた気泡の k の値は1/2に比べて非常に小さいと予想されるので, ka/g の値はさらに小さくなり, 流動抵抗に定常流の関係式をそのまま用いてもよいと考えられる。ただし, 本研究では抵抗係数 C_D がおよそどの程度の値をとるのかに着目したので, 詳細については今後のさらなる検討が必要である。

気泡体積 V_B が 1 cm^3 , 5 cm^3 の場合の抵抗係数 C_D をそれぞれ Fig.18~21 に示す。図中には3回の測定結果の平均値ではなくすべての測定値を載せている。また時間間隔は上昇速度の場合よりも短いので測定値の数が増えている。Fig.18と19はともに接触角 θ が 144° , 気泡体積 V_B が 1 cm^3 で, 丸棒直径 D がそれぞれ 1.0 cm と 2.5 cm の場合である。Fig.20と21はともに θ が 144° , V_B が 5 cm^3 で, D がそれぞれ 1.0 cm と 2.5 cm の場合を表している。なお, Rod freeの結果は水平面に投影した気泡形状を円と仮定して求めた。ここで, 気泡の画像から読み取った水平方向の最大長さを直径とした。 V_B が 1 cm^3 の場合, $\theta=144^\circ$ の丸棒を浸漬したときに丸棒に沿って上昇する気泡の C_D はおおむね0.5の値である。丸棒を設置しない自由上昇気泡は C_D がおよそ1.5の値であった。 V_B が 5 cm^3 の場合, $\theta=144^\circ$ の丸棒を浸漬するほとんどの位置で1より小さな値を取り, 気泡が上昇す

Fig. 18. Drag coefficient ($\theta=144^\circ$, $V_B=1\text{ cm}^3$, $D=1.0\text{ cm}$).Fig. 19. Drag coefficient ($\theta=144^\circ$, $V_B=1\text{ cm}^3$, $D=2.5\text{ cm}$).Fig. 20. Drag coefficient ($\theta=144^\circ$, $V_B=5\text{ cm}^3$, $D=1.0\text{ cm}$).

るにつれ C_D は大きくなった。このとき自由上昇気泡の C_D は1.5よりやや小さな値であった。接触角の大きな丸棒に沿って気泡が上昇するときに抵抗係数が小さくなるのは, 気泡が鉛直方向に長くなり, 後流による流動抵抗が小さくなるためである。

3・6 本実験結果から推測される, 浸漬ノズルに沿って上昇するアルゴン気泡の挙動

筆者らは以前に浸漬ノズル近傍を上昇する Ar ガス気泡

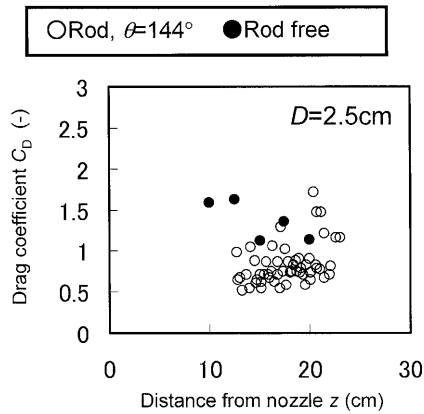


Fig. 21. Drag coefficient ($\theta=144^\circ$, $V_B=5\text{ cm}^3$, $D=2.5\text{ cm}$).

の上昇速度は自由上昇気泡の速度に等しいと仮定して、水と有機溶媒を用いたモールドパウダーの巻き込み実験を行い、巻き込みの可能性について論じた⁵⁾。ところが、本実験で明らかのように、Arガス気泡が浸漬ノズルに沿って上昇する場合には、その速度は自由上昇速度の3倍以上にもなる可能性があり、モールドパウダーの巻き込みの可能性はさらに高くなると考えられる。今後、巻き込み実験を行いこの点について検討したい。

モールドパウダーの巻き込みにはアルゴン気泡の上昇速度 u_B が大きく関与していると考えられる。式(1)と(2)を等しいとおいて整理すると u_B に対して次式が得られる。

$$u_B = [2V_B(\rho_L - \rho_G)g / (C_D A_p \rho_L)]^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

大胆ではあるが、例えば $V_B=100\text{ cm}^3$ （およそ鶏卵2個分の体積）の気泡が浸漬ノズルの吐出孔で生成し、本実験で観察されたような形状(Fig.17)で浸漬ノズルの外壁に付着しながら上昇すると仮定する。この場合、概略値として $A_p=20\text{ cm}^2$ とおけるので、この値と $C_D=0.5$ 、 $\rho_L - \rho_G \approx \rho_L = 7\text{ g/cm}^3$ （ $=7000\text{ kg/m}^3$ ）を式(5)に代入すれば、溶鋼中の浸漬ノズルに付着して上昇する気泡の上昇速度は約 140 cm s^{-1} となり、Fig. 5から予測される約 50 cm s^{-1} よりも非常に大きいことが予想される。ただし、詳細については今後の検討が必要である。

4. 結論

接触角が 77° 、 110° 、 144° の3種類の丸棒をノズルの真上に鉛直に浸漬して、気泡が上昇する様子を撮影した。自由上昇する気泡の場合と比較しつつ、気泡形状と気泡上昇速度に及ぼす丸棒の濡れ性と丸棒径の影響について調査した。得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 接触角が 77° と 110° の丸棒を浴内に浸漬したとき、気泡の上昇速度は気泡体積が 1 cm^3 あるいは 5 cm^3 の時には

丸棒を浸漬しない場合とほぼ同じ値をとり、気泡体積が 10 cm^3 、 15 cm^3 および 25 cm^3 のときには衝突による気泡の変形、分裂の影響によりやや小さくなった。

(2) 接触角が 144° の丸棒を浴内に浸漬したとき、気泡は丸棒に付着しながら上昇した。上昇速度は自由上昇速度の2~3倍の値をとり、丸棒径が大きくなると上昇速度は小さくなった。

(3) 接触角が 144° の丸棒に沿って上昇する気泡の抵抗係数 C_D を求めた。この場合の抵抗係数は自由上昇する気泡の抵抗係数よりも小さくなった。この抵抗係数を用いることによって、浸漬ノズルに沿って上昇するアルゴン気泡の上昇速度を予測することができる。

記号

A_p	: 気泡の水平面への投影面積(cm^2)
C_D	: 抵抗係数(-)
d	: 気泡の奥行き(cm)
D	: 丸棒径(cm)
F_D	: 流動抵抗(kg cm s^{-2})
g	: 重力加速度(cm s^{-2})
h	: 気泡の鉛直方向長さ(cm)
u_B	: 気泡上昇速度(cm s^{-1})
V_B	: 気泡体積(cm^3)
w	: 気泡の幅(cm)
z	: 気泡の鉛直方向位置(cm)
θ	: 水と丸棒との接触角(deg.)
ρ_G	: 気体の密度(g cm^{-3})
ρ_L	: 液体の密度(g cm^{-3})

文 献

- 1) K.Mori and M.Sano: *Testu-to-Hagané*, **67** (1981), 672.
- 2) D.Mazumdar and R.I.L.Guthrie: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 1.
- 3) O.J.Ilegbusi, M.Iguchi and W.Wahnsiedler: *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, (1999).
- 4) Z.Wang, K.Mukai, Z.Ma, M.Nishi, Z.Tsukamoto and F.Shi: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 795.
- 5) S.Yamashita and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1529.
- 6) K.Fukushi and M.Iguchi: *J. JSEM*, **4** (2004), No. 4, 192.
- 7) T.Yamashita, M.Iguchi and Y.Mizuno: *Jpn. J. Multiph. Flow*, **17** (2003), No. 1, 37.
- 8) Y.Mizuno, H.Inoue, N.Sonoyama and M.Iguchi: *Testu-to-Hagané*, **86** (2000), 709.
- 9) N.Sonoyama, M.Iguchi, Y.Sasaki, K.Ishii: *Testu-to-Hagané*, **86** (2000), 203.
- 10) N.Sonoyama and M.Iguchi: *Metall. Mater. Trans. B*, **32B** (2002), No. 2, 155.
- 11) T.Inoue, M.Iguchi and Y.Mizuno: *Jpn. J. Multiph. Flow*, **15** (2001), No. 2, 158.
- 12) Y.Mizuno and M.Iguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **68** (2002), 2984.
- 13) R.Clift, J.R.Grace and M.E.Weber: *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, New York, (1978).
- 14) K.Ichikawa and I.Lin: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 170.
- 15) K.Fukushi and M.Iguchi: *J. JSEM*, **6** (2006), No. 4, 412.
- 16) *Jpn. Soc. Fluid Dynamics: Handbook of Fluid Dynamics*, 2nd ed., Maruzen, Tokyo, (1998), 54.